PHOTOBIOREACTOR **LEPAS PANTAI UNTUK PRODUKSI** ***BIOFUEL*** **BERBASIS MIKROALGA HASIL REKAYASA GENETIK SEBAGAI SUMBER ENERGI BERKELANJUTAN DI INDONESIA**

Oleh

YUDISTHIRA OKTAVIANDIE
NPM 1406600180

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
2017

LEMBAR PENGESAHAN

1. Judul Karya	:	*PHOTOBIOREACTOR* LEPAS PANTAI UNTUK PRODUKSI *BIOFUEL* BERBASIS MIKROALGA HASIL REKAYASA GENETIK SEBAGAI SUMBER ENERGI BERKELANJUTAN DI INDONESIA
2. Topik	:	Kedaulatan Energi
3. Profil Penulis		
a. Nama Lengkap	:	Yudisthira Oktaviandie
b. NIM	:	1406600180
c. Jurusan	:	Biologi
d. Universitas/Institut/Politeknik	:	Universitas Indonesia
e. Alamat Rumah dan No.Telp/HP	:	Jl. Subulussalam No.04 RT.36, Samarinda +62 813 4700 4775
f. Alamat Email	:	yudisthira.oktaviandie@gmail.com

Depok, 3 Mei 2017

Menyetujui,

Dosen Pembimbing

(Dr. Dra. Andi Salamah)

NIP. 196711071993032003

Penulis

(Yudisthira Oktaviandie)

NIM. 1406600180

Direktur Kemahasiswaan

UNIVERSITAS INDONESIA PUSAT ADMINISTRASI

(Dr. Arman Nefi, S.H., M.M.)

NUK. 0508050277

SURAT PERNYATAAN

Saya bertanda tangan dibawah ini:

Nama	: Yudisthira Oktaviandie
Tempat/Tanggal Lahir	: Samarinda/03 Oktober 1997
Program Studi	: Biologi
Fakultas	: FMIPA
Perguruan Tinggi	: Universitas Indonesia
Judul Karya Tulis	: *PHOTOBIOREACTOR* LEPAS PANTAI UNTUK PRODUKSI BIOFUEL BERBASIS MIKROALGA HASIL REKAYASA GENETIK SEBAGAI SUMBER ENERGI BERKELANJUTAN DI INDONESIA

Dengan ini menyatakan bahwa karya tulis yang saya sampaikan pada kegiatan Pilmapres ini adalah benar karya saya sendiri tanpa tindakan plagiarism dan belum pernah diikutsertakan dalam lomba karya tulis.

Apabila di kemudian hari ternyata pernyataan saya tersebut tidak benar, saya bersedia menerima sanksi dalam bentuk pembatalan predikat mahasiswa berprestasi.

Depok, 3 Mei 2017

Mengetahui,
Dosen pendamping

Dr. Dra. Andi Salamah
NIP. 196711071993032003

Yang menyatakan

METERAI TEMPEL
TGL. 20
0B722AEF354807131
6000
ENAM RIBU RUPIAH

Yudisthira Oktaviandie
NIM 1406600180

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirrabbilalamin, segala puji syukur penulis ucapkan kepada Allah, karena atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan karya tulis ilmiah yang berjudul "*PHOTOBIOREACTOR* LEPAS PANTAI UNTUK PRODUKSI *BIOFUEL* BERBASIS MIKROALGA HASIL REKAYASA GENETIK SEBAGAI SUMBER ENERGI BERKELANJUTAN DI INDONESIA".

Karya tulis ilmiah ini disusun secara maksimal dengan bantuan berbagai pihak sehingga dapat diselesaikan dengan lancar. Untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih terutama kepada orang tua penulis yang selalu mendukung dan menyemangati penulis untuk selalu memberikan yang terbaik. Terima kasih pula kepada Bu Dr. Dra. Andi Salamah dan Astari Dwiranti M.Eng., Ph. D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan masukan dalam pembuatan makalah. Tidak lupa terima kasih kepada kawan-kawan yang mendukung proses penyusunan karya tulis ilmiah yaitu Alexander Tianara, Icha Ludyawati, Muhammad Iqbal Syauqi, Muhammad Rasyid Ridho, Sarah Audadi Ilham, Devita Olyviana Putri, Diah Retno Yuniarni, Rifa Mutiara serta kawan-kawan lain yang selalu mendoakan dan menyemangati.

Terlepas dari itu semua, penulis menyadari akan kekurangan dalam karya tulis ilmiah ini. Penulis sadar kekurangan itu tidak lain timbul dari diri penulis sendiri dan bukan dari pihak manapun. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran untuk dapat memperbaiki kekurangan dalam karya tulis ini.

Dengan segala kerendahan hati, penulis berharap semoga karya tulis ini bermanfaat bagi pembacanya. Akhir kata, segala kebaikan yang ada dalam tulisan ini adalah berkat karunia-Nya dan segala bentuk bantuan dari berbagai pihak dan segala kekurangan yang ada dalam tulisan ini adalah datangnya dari penulis seorang.

Depok, 3 Mei 2017

Penulis

Yudisthira Oktaviandie

DAFTAR ISI

SUMMARY

The energy crisis is a major problem faced by Indonesia. Indonesia's dependency on fossil fuels may reach its limit due to the decrease of fossil fuel stockpiles. Indonesia's fossil fuel reserves could be depleted in 12 years for oils, 37 years for natural gases, and 70 years for coals. This crisis will continue until new sources of fossil fuel reserves are discovered or a renewable energy is developed.

The development of renewable energy should be Indonesia's main strategy to overcome energy crisis. One of the most promising renewable energy sources to be developed in Indonesia is biofuel. Currently, the biofuel national production can not fulfill national demand of biofuels. Therefore, improvement of biofuel production technology is needed.

Development of biofuel production facility is limited by three main problems, which are land usage, freshwater usage and the usage of food-source plant. Development of an offshore photobioreactor for production of microalgae-based biofuels can tackle these problems. As an offshore photobioreactor uses microalgae to produce biofuel, it will not interfere with food supply. In addition, the microalgae used are natural inhabitants of saltwater. So, development of an offshore photobioreactor will not be competing with the use of land for agriculture or urban development. In addition, it will not interfere with freshwater supply as well.

Microalgae are a potential source of biofuel in Indonesia. Biofuel is made by lipid conversion extracted from the microalgae cell. Microalgae has some benefits over other sources as a biofuel source, such as relatively short growth period, cosmopolitan (can be found almost everywhere) and not a food source. However, the usage of microalgae as a biofuel source is still underdeveloped.

Optimizing biofuel production by microalgae is very important and it can be done by genetic engineering of microalgae. The productivity of microalgae is significantly increased by genetic engineering. There are several parameters of microalgae productivity. They are the improvement of lipid quantity and quality, improvement of photosynthesis efficiency, secretion of product and direct

formation of biofuel *in vivo* (inside the cell). The improvement of biofuel production efficiency will have an impact on the biofuel price.

Genetic engineering of biofuel production occurs in several steps. Insufficient quantity of lipid can be improved in three ways, namely improvement of lipid biosynthesis, inhibition of starch biosynthesis and lipid catabolism. The improvement of lipid biosynthesis can be done by overexpressing the G3PDH, LPAAT and DAGAT genes. The inhibition of starch biosynthesis and lipid catabolism can be done by deleting the ADP-glucose pyrophosphosphorylase and acyl-CoA dehydrogenase genes, respectively. The lipid quality can be improved by overexpressing the thioesterase gene. The photosynthetic efficiency can be increased by overexpressing the photosystem II and deleting the terminal oxidase gene. The microalgae cell can secrete the product by overexpressing the ABC transporter. Finally, it is possible to convert lipid into biofuel directly by overexpressing pyruvate decarboxylase and WS/DGAT gene.

Economic analysis of development of microalgae biofuel shows that biofuel production cost is expensive in the early development, but it will decrease overtime accompanied by development of its production efficiency. Biofuel to production cost by offshore photobioreactor can be decreased to Rp5.003,00 per liter. That value excludes additional costs from the genetic engineering process. However, those additional costs will be offsetted by a reduction in long-term operational costs.

Therefore, by implementing this idea, Indonesia can fulfill its own biofuel needs and overcome the energy crisis. The development of offshore photobioreactor will not disturb land usage and freshwater supply. In addition, the genetic engineering will optimize microalgae productivity, so it can maximize its potential as a biofuel source. Microalgal biofuel production cost will be decreased, even though it needs additional cost.

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketahanan energi Indonesia tengah mengalami pengeroposan. Cadangan energi Indonesia, terutama energi fosil terus berkurang tiap tahunnya. Berdasarkan laporan Dewan Energi Nasional, pada tahun 2014, cadangan terbukti minyak bumi berjumlah 3,6 miliar barel, gas bumi berjumlah 100,3 TCF (*trillion cubic feet*) dan batubara berjumlah 32,27 miliar ton. Dengan jumlah itu, cadangan minyak bumi diperkirakan akan habis dalam 12 tahun, gas bumi 37 tahun, dan batu bara 70 tahun dengan asumsi tidak ditemukannya cadangan baru (PTSEIK, 2016).

Untuk menanggulangi krisis energi nasional, Pemerintah mengandalkan impor untuk memenuhi kebutuhan energi dalam negeri. Diperkirakan pada tahun 2050, impor minyak bumi akan meningkat 8 kali lipat menjadi 933 juta barel dan impor gas akan meningkat menjadi 118 BCF (*billion cubic feet*) atau 40% dari kebutuhan total. Ketergantungan impor energi Indonesia akan terus menguras devisa negara yang berdampak pada depresiasinya nilai tukar rupiah terhadap mata uang Amerika Serikat (PTSEIK, 2016).

Untuk memenuhi kebutuhan energi nasional, Indonesia membutuhkan sumber energi yang berkelanjutan atau energi baru terbarukan (EBT). Masih banyak potensi EBT di Indonesia yang belum dieksplorasi dan dimanfaatkan secara maksimal. Saat ini, Indonesia hanya memanfaatkan beberapa sumber EBT, antara lain panas bumi, hidro, biomassa, energi surya, energi angin, dan uranium, sedangkan sumber EBT lainnya seperti pasang surut dan gelombang laut belum dimanfaatkan (PTSEIK, 2016). Hal-hal yang berkaitan dengan pemanfaatan EBT menghadapi kendala, terutama disebabkan oleh permasalahan pengembangan baik yang terkait dengan pembiayaan jangka panjang maupun pengadaan lahan infrastruktur serta harga EBT yang belum bersaing di pasar dalam negeri (Sekretariat Dewan Energi Nasional, 2015).

Di sisi lain, Pemerintah Indonesia telah menentukan arah kebijakan energi, terutama untuk menghemat bahan bakar minyak bumi dan mengembangkan

sumber–sumber energi alternatif lainnya. Kebijakan tersebut tertuang pada Kebijakan Energi Nasional (KEN). Langkah yang diambil oleh Pemerintah untuk mengendalikan konsumsi BBM bersubsidi adalah pembatasan volume BBM bersubsidi yang dikonsumsi dengan mencampurkan bahan bakar minyak bersubsidi dengan bahan bakar nabati (BBN), sedangkan langkah untuk mengembangkan energi alternatif adalah dengan pembangunan infrastruktur pendukung dan dukungan fiskal secara langsung. Pencampuran BBN, atau yang popular disebut ***biofuel***, dengan BBM bersubsidi akan terus ditingkatkan setiap tahunnya. Kebijakan itu tertuang dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Alam (Permen ESDM) Nomor 12 Tahun 2015 yang mengatur persentase BBN dalam BBM bersubsidi. Meskipun demikian, kebijakan ini menghadapi beberapa kendala. Salah satunya adalah BBN yang dicampurkan dengan BBM bersubsidi ternyata BBN impor.

Lalu, apa yang dapat dilakukan oleh Indonesia? Indonesia memiliki ragam jenis sumber *biofuel*, seperti kelapa sawit, tebu, jagung, ubi kayu, molase (produk sampingan industri gula), dan jarak. Meskipun demikian, produksi *biofuel* di Indonesia belum bisa mencukupi kebutuhan dalam negeri pada masa mendatang sesuai dengan mandat mengenai *biofuel* yang tertuang di dalam KEN. Untuk itu diperlukan percepatan pengembangan teknologi *biofuel* dan penggunaan bahan baru sebagai sumber *biofuel* (Sekretariat Dewan Energi Nasional, 2015).

Sumber lain yang potensial untuk pengembangan *biofuel* adalah mikroalga. Penggunaan mikroalga sebagai sumber *biofuel,* terutama biodiesel telah banyak diketahui, namun di Indonesia sendiri belum ada fasilitas industri *biofuel* skala besar berbasis mikroalga. Padahal, dibandingkan dengan sumber lainnya, mikroalga memiliki beberapa keuntungan, antara lain waktu pertumbuhan yang relatif singkat; bukan merupakan komoditas pangan sehingga tidak bersaing sebagai sumber pangan; serta pertumbuhannya yang tidak terlalu bergantung cuaca dan dapat di produksi hampir di setiap daerah di Indonesia, khususnya karena Indonesia dikelilingi oleh perairan yang lebih luas daripada daratan.

Pada makalah ilmiah ini, penulis akan membahas potensi pengembangan *photobioreactor* mikroalga di Indonesia serta pendekatan strategis baik secara teknis maupun kebijakan strategis bagi pemangku kepentingan (*stakeholders*)

terkait. Penulis berharap makalah ini dapat menjadi acuan teoretis bagi pengembangan *biofuel* berbasis alga di Indonesia guna menjadikan Indonesia sebagai produsen *biofuel* terdepan. Dengan demikian, *biofuel* produksi Indonesia dapat mengatasi pengeroposan ketahanan energi nasional, bahkan mampu menjadi komoditas ekspor.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, permasalahan yang akan dikaji secara mendalam dalam penulisan karya ilmiah ini adalah sebagai berikut:

(1) Bagaimana cara memaksimalkan hasil produksi *biofuel* berbasis mikroalga?

(2) Rekayasa genetik apa yang diperlukan mikroalga untuk meningkatkan produksi *biofuel*?

(3) Bagaimana *photobioreactor* mikroalga lepas pantai dirancang?

(4) Bagaimana analisis ekonomi terkait dengan pengembangan *biofuel* dari mikroalga hasil rekayasa genetik pada *photobioreactor* lepas pantai?

1.3 Uraian Singkat mengenai Gagasan Kreatif

Photobioreactor mikroalga lepas pantai merupakan fasilitas produksi biomassa mikroalga berkelanjutan yang diharapkan dapat menjadi sarana produksi *biofuel* utama di Indonesia. Fasilitas ini menghasilkan energi yang ramah lingkungan. Mikroalga digunakan sebagai bahan baku dari *biofuel* karena mikroalga mudah dan cepat ditumbuhkan dibandingkan tumbuhan tingkat tinggi, seperti kelapa sawit dan tebu. Fasilitas ini cocok dikembangkan terutama di kota pesisir dimanapun di Indonesia. Dengan demikian, suatu daerah dapat memiliki sumber energi utama walaupun daerah tersebut tidak memiliki cadangan energi fosil. Selain itu, daerah pesisir dipilih karena Indonesia merupakan negara kepulauan dengan daerah pesisir yang sangat luas. Untuk meningkatkan efisiensi produksi *biofuel* berbasis mikroalga, penulis dalam karya tulis ilmiah ini mengajukan gagasan rekayasa genetik mikroalga. Rekayasa genetik mikroalga diperlukan terutama untuk mengatasi beberapa kendala terkait produksi *biofuel* berbasis mikroalga, seperti untuk meningkatkan kandungan lipid, meningkatkan

efisiensi fotosintesis, dan meningkatkan kemampuan adaptasi terhadap kondisi lingkungan tertentu. Dalam produksi *biofuel* berbasis mikroalga hasil rekayasa genetik, penulis mengajukan gagasan pembangunan *photobioreactor* lepas pantai. Potensi sumber daya kemaritiman Indonesia telah menjadi berkah alam yang luas tersedia sehingga memungkinkan pembangunan *photobioreactor* mikroalga berbasis rekayasa genetik. Tinggallah yang diharapkan berikutnya adalah dukungan pemerintah sebagai pengatur kebijakan, pihak swasta sebagai pelaksana proyek, akademisi sebagai basis pengembangan, dan masyarakat umum sebagai konsumen yang akan turut berpengaruh besar dalam pengembangan dan keberlanjutan *photobioreactor* lepas pantai.

1.4 Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan karya ilmiah ini adalah sebagai berikut:

(1) Mengkaji cara memaksimalkan hasil produksi dari *photobioreactor* lepas pantai.

(2) Mengkaji rekayasa genetik mikroalga untuk meningkatkan produksi *biofuel*

(3) Mengkaji rancangan *photobioreactor* lepas pantai.

(4) Menganalisis pandangan ekonomi dalam pengembangan *biofuel* berbasis mikroalga di Indonesia.

1.5 Manfaat Penulisan

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

(1) Memberikan kajian integratif dan rekomendasi mengenai pengembangan *biofuel* berbasis mikroalga di Indonesia.

(2) Sebagai acuan dalam pengembangan galur unggul mikroalga hasil rekayasa genetik untuk peningkatan produksi *biofuel*.

(3) Sebagai landasan teori dalam pengembangan *photobioreactor* lepas pantai di Indonesia.

BAB 2

TELAAH PUSTAKA

2.1 Mikroalga

Mikroalga merupakan kelompok polifiletik dari mikroorganisme yang dapat melakukan fotosintesis oksigenik. Mikroalga terdiri atas prokariota dan eukariota. Prokariota yang dikelompokan sebagai mikroalga dikenal sebagai cyanobacteria, sedangkan eukariota yang dikelompokkan sebagai mikroalga, antara lain chlorophyta dan diatom. Mikroalga memilik peran ekologis yang utama sebagai produsen primer ekosistem perairan dan berperan dalam mengurangi gas rumah kaca di atmosfer (Szaub, 2012).

Mikroalga memiliki banyak potensi, antara lain sebagai sumber bahan obat dan suplemen, sumber makanan manusia dan pakan ternak, pupuk dalam agrikultur, dan bahan baku *biofuel*. Bahan obat dan suplemen dari mikroalga dapat berupa vitamin, asam lemak esensial, ataupun antibiotik. *Spirulina sp.* dan *Dunaliella sp.* merupakan alga yang biasa dimanfaatkan sebagai bahan obat dan suplemen. Untuk pakan hewan, alga kering dapat dicampurkan dengan pakan hewan lainnya, sedangkan untuk makanan manusia, alga dapat dijadikan sebagai penyulih sumber protein. Protein yang berasal dari alga ini dikenal sebagai protein sel tunggal yang biasa dimanfaatkan dari *Chlorella sp* dan *Spirulina sp*. Selain itu, kandungan minyak dari alga juga dapat digunakan untuk menggantikan minyak nabati atau minyak sayur. Dalam dunia agrikultur, alga yang biasa dimanfaatkan sebagai pupuk adalah alga yang memiliki kemampuan untuk memfiksasi nitrogen seperti *Nostoc sp.* yang dapat ditemukan di tanah. Tidak hanya itu, mikroalga juga merupakan bahan baku *biofuel* karena mengandung lipid hingga 85% dari total berat keringnya. Salah satu alga yang telah diketahui potensinya sebagai bahan baku dari *biofuel* adalah *Botryococcus sp.* yang telah teridentifikasi mengandung lipid hingga 70% dari total berat keringnya (Szaub, 2012).

2.2 *Biofuel* Berbasis Mikroalga

Biofuel merupakan bahan bakar yang dihasilkan dari organisme hidup. *Biofuel* yang umum dikenal oleh masyarakat adalah bioetanol dan biodiesel, sedangkan biogas dan biohidrogen adalah bahan bakar lainnya yang belum banyak dikembangkan. *Biofuel* berbasis mikroalga sendiri pada umumnya berupa biodiesel. Hal ini karena produk yang diekstrak dari alga berupa hidrokarbon. Meskipun demikian, adapula beberapa potensi yang masih diselidiki lebih lanjut mengenai kemampuan mikroalga dalam menghasilkan biohidrogen.

Dibandingkan dengan tumbuhan tingkat tinggi, penggunaan mikroalga sebagai bahan baku *biofuel* memiliki beberapa keunggulan. Waktu yang dibutuhkan oleh mikroalga untuk memperbanyak diri lebih singkat daripada tumbuhan tingkat tinggi, yang dapat memakan waktu hingga tahunan. Pertumbuhan tumbuhan tingkat tinggi dan mikroalga sangat bergantung pada lingkungan sekitarnya seperti pH tanah, suhu, dan curah hujan. Meskipun demikian, kondisi lingkungan pertumbuhan pada mikroalga dapat diatur dengan pembuatan *photobioreactor* (PBR), sedangkan untuk tumbuhan tingkat tinggi, pembuatan reaktor untuk mendukung pertumbuhan sangat tidak efisien dari sisi biaya. Biomassa yang dihasilkan dari mikroalga juga lebih banyak daripada biomassa tumbuhan tingkat tinggi per hektare-nya. Selain itu, panen biomassa mikroalga dapat dilakukan dengan tidak bergantung pada musim, yang artinya mikroalga adalah sumber yang berkelanjutan (Nazari dan Raheb, 2015). Pemilihan spesies dan galur mikroalga yang toleran terhadap air asin—yang demikian melimpah di Indonesia—dapat mengurangi penggunaan air tawar. Selain itu, rekayasa genetik, yang sering dilakukan untuk memaksimalkan potensi suatu makhluk hidup, terutama untuk meningkatkan produksi agar produk yang dihasilkan memiliki daya saing di pasar, lebih mudah dilakukan pada mikroalga dibandingkan dengan tumbuhan tingkat tinggi (Hannon dkk., 2010).

2.3 Kondisi *Biofuel* Terkini dan Tantangannya

Biofuel yang ada saat ini umumnya merupakan hasil olahan tumbuhan. Tumbuhan yang digunakan untuk produksi *biofuel* antara lain jagung dan tebu untuk diolah menjadi bioetanol serta kedelai dan kelapa sawit untuk diolah menjadi biodiesel. Penggunaan tumbuhan sumber pangan seperti jagung, tebu dan

kedelai untuk produksi *biofuel* merupakan strategi yang tidak tepat karena masih banyak penduduk dunia yang kelaparan.

Bertambahnya kebutuhan energi seiring dengan pertumbuhan ekonomi akan berdampak pada bertambahnya sarana fasilitas produksi *biofuel*. Penggunaan lahan untuk produksi pun akan semakin banyak diperlukan. Agar tidak bersaing dengan pembangunan tempat tinggal maupun pertanian, seringkali lahan baru dibuka untuk mendirikan fasilitas *biofuel*. Seringkali lahan yang dibuka merupakan hutan dan tentunya hal ini akan berdampak pada lingkungan.

Selain tantangan lahan, pengembangan *biofuel* juga menghadapi tantangan dengan penggunaan air tawar. Sejauh ini, organisme yang menjadi sumber dari *biofuel* sangat bergantung pada air tawar. Namun, air tawar di dunia sangat terbatas. Penggunaan air tawar untuk pengembangan *biofuel* akan terus bertambah seiring dengan pertumbuhan ekonomi, namun, sayangnya, tidak diiringi dengan upaya peningkatan ketersediaan air tawar. Dengan demikian, pada masa mendatang kebutuhan energi akan bersaing dengan kebutuhan air tawar dan akan menimbulkan polemik baru jika solusi tidak ditemukan secepatnya (Hannon dkk., 2010).

BAB 3
ANALISIS DAN SINTESIS

3.1 Optimasi Produksi *Biofuel* Berbasis Mikroalga

Pada bab sebelumnya telah ditunjukkan kelebihan mikroalga sebagai salah satu sumber energi yang menghasilkan *biofuel* dibandingkan bahan-bahan baku yang lain. Akan tetapi, mikroalga pun mempunyai kelemahan sehingga perlu dilakukan optimasi produksi *biofuel* berbasis mikroalga.Berikut inipenulis menskemakan rancangan penulis tentang upaya optimasi produksi *biofuel* berbasis mikroalga. Rancangan penulis ini merupakan sintesis gagasanyang mengacu pada hasil-hasil penelitian para peneliti terdahulu tentang mikroalga.

Gambar 1. Rancangan Optimasi Produksi *Biofuel* Berbasis Mikroalga

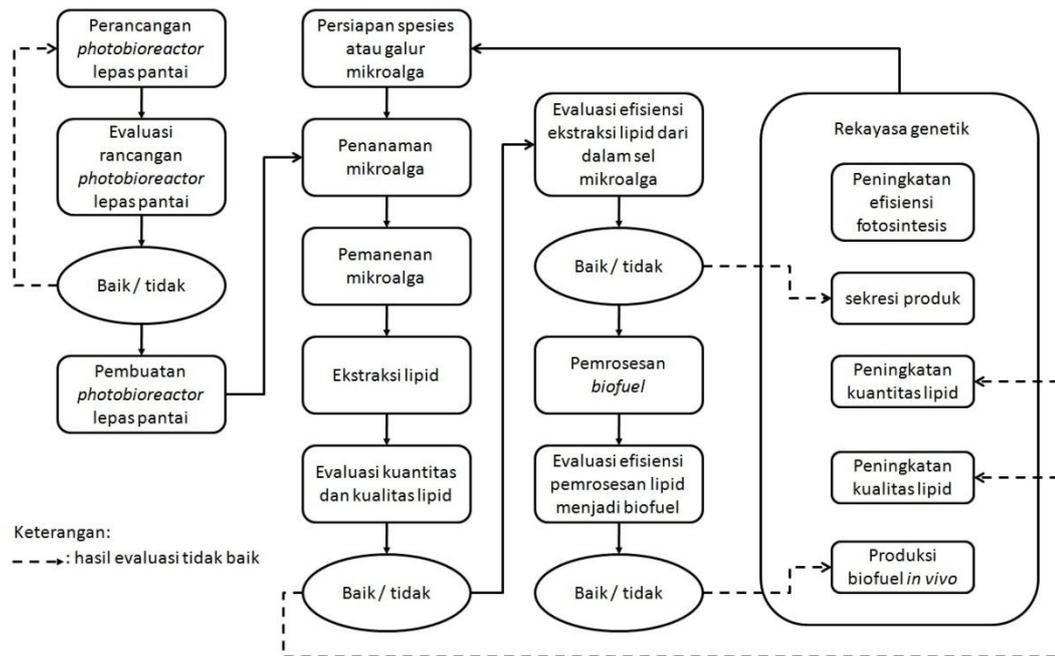
(Sumber: Sintesis oleh Penulis)

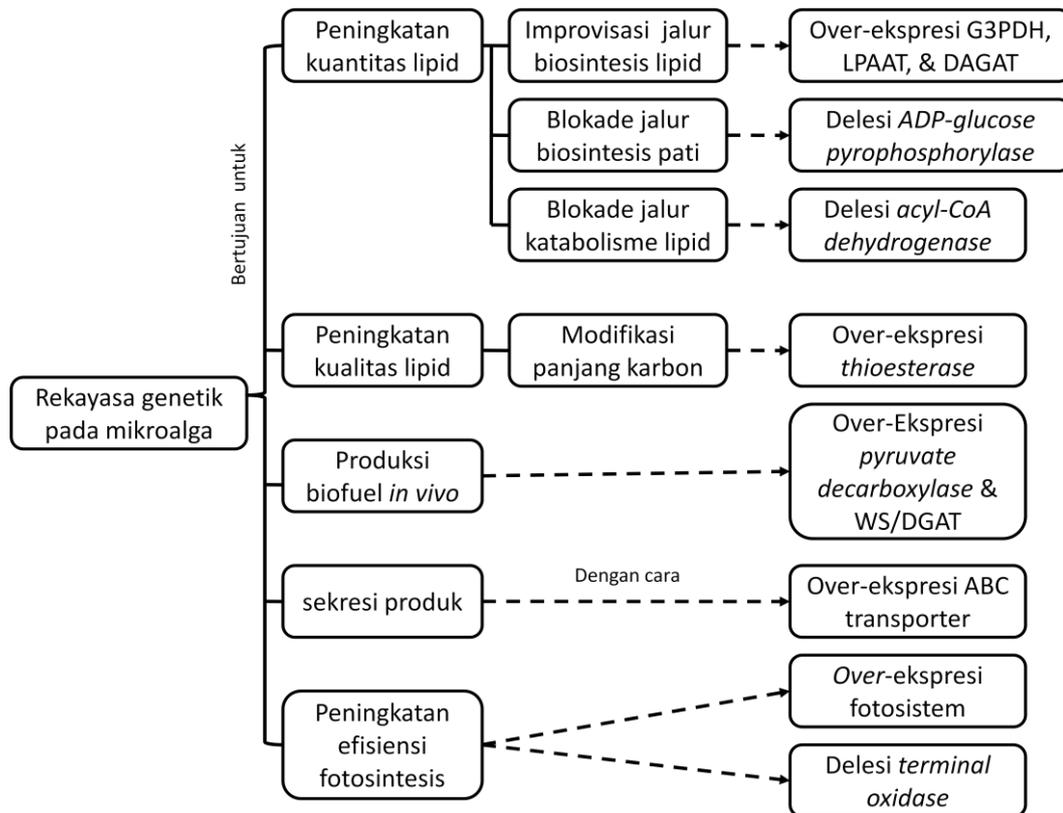
Skema diatas memperlihatkan bahwa langkah pertama dari optimasi produksi *biofuel* berbasis mikroalga adalah persiapan spesies dan galur unggul. Spesies dan galur unggul dipilih berdasarkan kemampuan mikroalga tersebut sebagai bahan baku *biofuel*. Umumnya, karakter utama yang diperhatikan adalah persentase lipid per total biomassa, laju pertumbuhan dan karakter pendukung lainnya seperti ketahanannya terhadap kondisi lingkungan tertentu. Dalam hal ini, kandidat mikroalga yang paling berpotensi sebagai sumber *biofuel* adalah *Botryococcus braunii* karena mikroalga ini memiliki kandungan minyak 25% – 75% dari total biomassa (Chisti, 2007) dan rantai hidrokarbon yang dihasilkannya paling mirip dengan komposisi minyak mentah dari fosil. Meskipun demikian, *Botryococcus braunii* memiliki laju pertumbuhan yang sangat lambat (Borowitzka & Borowitzka, 1988). Mikroalga lain yang juga dapat dijadikan kandidat mikroalga untuk *biofuel* adalah *Chlorella sorokiniana* sebagai salah satu mikroalga dengan laju pertumbuhan tercepat (Szaub, 2012).

Langkah berikutnya adalah rekayasa genetik untuk mengatasi kekurangan yang dimiliki oleh kandidat mikroalga yang akan dieksploitasi. Rekayasa genetik pada mikroalga lebih mudah dilakukan daripada rekayasa genetik pada tumbuhan tingkat tinggi. Rekayasa genetik terlaksana apabila potensi dan kemampuan khusus setiap mikroalga telah diketahui. Karakter unggul yang sesuai dengan kebutuhan diambil dan direkayasa ke mikroalga yang diinginkan. Karakter unggul yang ingin dicapai agar dapat meningkatkan produksi *biofuel*, antara lain diperoleh dengan meningkatkan efisiensi fotosintesis untuk meningkatkan biomassa, meningkatkan laju pertumbuhan biomassa, meningkatkan komposisi lipid per berat total biomassa, meningkatkan kemampuan sekresi produk dan meningkatkan kemampuan adaptasi mikroalga terhadap kondisi lingkungan tertentu (Nazari & Raheb, 2015).

Kemudian, strategi pembuatan fasilitas produksi juga diperlukan untuk dapat meningkatkan efisiensi produksi. Salah satu strateginya adalah pembuatan *photobioreactor* lepas pantai. Pembuatan *photobioreactor* lepas pantai dapat mengatasi beberapa masalah, antara lain penggunaan tumbuhan pangan, permasalahan lahan, dan permasalahan air tawar. *Photobioreactor* lepas pantai yang menggunakan mikroalga sebagai sumber *biofuel* telah mengatasi ketergantungan produksi *biofuel* dari tumbuhan pangan. Selain itu, penggunaan mikroalga yang habitatnya di perairan lepas pantai juga akan mengatasi kurangnya lahan untuk pembangunan fasilitas produksi. Demikian pula dengan permasalahan air tawar yang teratasi karena pada fasilitas *photobioreactor* mikroalga lepas pantai digunakan mikroalga yang toleran terhadap air asin baik secara alami maupun hasil rekayasa.

3.2 Rekayasa Genetik Mikroalga untuk Meningkatkan Produksi *Biofuel*

Rekayasa genetik pada mikroalga memiliki dua tujuan, yaitu meningkatkan kemampuan yang diinginkan atau menghilangkan suatu kemampuan yang menghambat. Hal itu dilakukan dengan menyisipkan suatu sekuens DNA ataupun menghilangkan sebagian sekuens DNA. Insersi ataupun delesi dari sekuens DNA akan memengaruhi produksi enzim yang selanjutnya juga akan berpengaruh pada regulasi internal dari sel mikroalga. Insersi sekuens DNA asing ke dalam mikroalga dapat dilakukan dengan transformasi vektor plasmid yang telah disisipkan gen yang diinginkan. Insersi sekuens DNA asing juga dapat dilakukan dengan rekombinasi homolog sehingga gen yang diinginkan akan meng-*knockout* gen yang berkomplemen. Dengan kata lain, rekombinasi homolog juga dapat mendelesi gen yang tidak diinginkan. Rekombinasi homolog dilakukan dengan transformasi vektor plasmid yang telah disisipkan gen yang diinginkan diantara sekuens yang berkomplemen dengan gen target (Varman, 2010).

Gambar 2. Skema Kerja Keterlibatan Rekayasa Genetik dalam Produksi *Biofuel* dari Mikroalga
(Sumber: Sintesis oleh Penulis)

Berdasarkan skema diatas, keterlibatan rekayasa genetik dalam produksi biofuel dari mikroalga terjadi pada beberapa titik. Rekayasa genetik dilakukan apabila hasil evaluasi menunjukkan hasil yang tidak baik pada tahapan produksi biofuel tertentu. Jika hasil evaluasi yang menunjukkan kuantitas dan kualitas lipid yang tidak baik, interferensi rekayasa genetik perlu dilakukan untuk meningkatkan kuantitas dan kualitas lipid. Demikian pula dengan peningkatan efisiensi proses ekstraksi lipid akan dilakukan dengan rekayasa genetik apabila proses ekstraksi tidak efisien. Proses konversi lipid menjadi *biofuel* yang tidak efisien juga akan melibatkan rekayasa genetik untuk membuat proses tersebut lebih efisien. Berdasarkan skema diatas pula, dapat disimpulkan bahwa tidak semua tahapan pada proses produksi *biofuel* dapat melibatkan rekayasa genetik untuk meningkatkan efisiensinya.

Gambar 3. Rancangan Target Rekayasa Genetik pada Mikroalga
untuk Meningkatkan Produksi *Biofuel*
(Sumber: Sintesis oleh Penulis)

Gambar diatas menunjukkan beberapa target rekayasa genetik untuk meningkatkan produksi *biofuel*. Peningkatan kuantitas lipid dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu improvisasi jalur biosintesis lipid, blokade jalur biosintesis pati, dan blokade jalur katabolisme lipid. Kualitas lipid yang ingin ditingkatkan adalah modifikasi panjang karbon dari lipid yang dihasilkan karena hanya panjang karbon tertentu yang dapat dikonversikan menjadi *biofuel*. Produksi *biofuel in vivo* bertujuan agar konversi lipid menjadi *biofuel* dapat terjadi secara otomatis di dalam sel mikroalga sehingga proses konversi secara manual oleh manusia maupun mesin tidak perlu dilakukan. Rekayasa genetik agar mikroalga dapat menyekresikan produknya juga perlu dilakukan karena proses ekstraksi produk dari sel mikroalga merupakan salah satu hambatan dari produksi *biofuel*. Untuk meningkatkan produktivitas mikroalga secara keseluruhan, efisiensi fotosintesis perlu ditingkatkan.

Untuk meningkatkan produksi lipid, beberapa cara dapat dilakukan terutama dengan meningkatkan ekspresi enzim terkait dengan biosintesis lipid dan memblokir jalur biosintesis pati agar lipid dapat terakumulasi lebih banyak serta memblokir jalur katabolisme lipid, sehingga lipid yang terbentuk tidak digunakan oleh mikroalga. *Over*-ekspresi dari enzim dari *glycerol-3-phospate acyltransferase* (G3PDH), *lysophosphatidic acid acyltransferase* (LPAAT) dan *diacylglycerol acyltransferase* (DAGAT) yang berperan dalam biosintesis lipid terbukti meningkatkan produksi lipid secara signifikan pada tumbuhan tingkat tinggi (Radakovits dkk. 2010). Ketiga enzim tersebut juga ditemukan pada jalur biosintesis lipid mikroalga, sehingga ada kemungkinan besar *over*-ekspresi G3PDH, LPAAT, dan DAGAT pada mikroalga akan memiliki hasil yang sama seperti pada tumbuhan tingkat tinggi. Meskipun demikian, perlu dilakukan pengujian terlebih dahulu untuk memastikan hasil yang didapat dari *over*-ekspresi G3PDH, LPAAT dan DAGAT pada mikroalga. Peningkatan produksi lipid juga teramati pada mutan mikroalga *Chlamydomonas reinhardtii* tanpa pati hasil dari delesi subunit enzim ADP-*glucose pyrophosphorylase* (Zabawinski dkk. 2001). Mutan *Chlorella pyrenoidosa* tanpa pati juga diketahui mengalami peningkatan asam lemak tidak jenuh (Ramazanov dan Ramazanov, 2006). Pemutusan jalur beta-oksidasi juga dapat meningkatkan akumulasi lipid, mengingat bahwa mikroalga menggunakan lipid melalui jalur beta-oksidasi pada kondisi fisiologis tertentu sebagai sumber energi cadangan. Lipid disintesis pada siang hari dan akan digunakan pada malam hari ketika tidak ada cahaya. Apabila jalur beta-oksidasi diputus, pertumbuhan mikroalga pada malam hari akan terhambat, terutama pada mikroalga yang dibiakkan pada sistem terbuka. Oleh karena itu, pemutusan jalur beta-oksidasi tidak disarankan. Selain itu, diperlukan kajian mengenai *cost and benefit* antara terhambatnya pertumbuhan dan akumulasi lipid akibat dari pemutusan jalur beta-oksidasi (Radakovits dkk. 2010).

Selain bertujuan untuk meningkatkan kuantitas produksi, rekayasa genetik juga dapat dilakukan untuk meningkatkan kualitas produk. Dalam hal ini, kualitas yang ingin ditingkatkan adalah meningkatkan produk lipid yang dihasilkan sesuai dengan standar bahan baku yang dapat dijadikan sebagai *biofuel*. Umumnya, mikroalga menghasilkan rantai asam lemak dengan panjang 14 hingga 20 karbon,

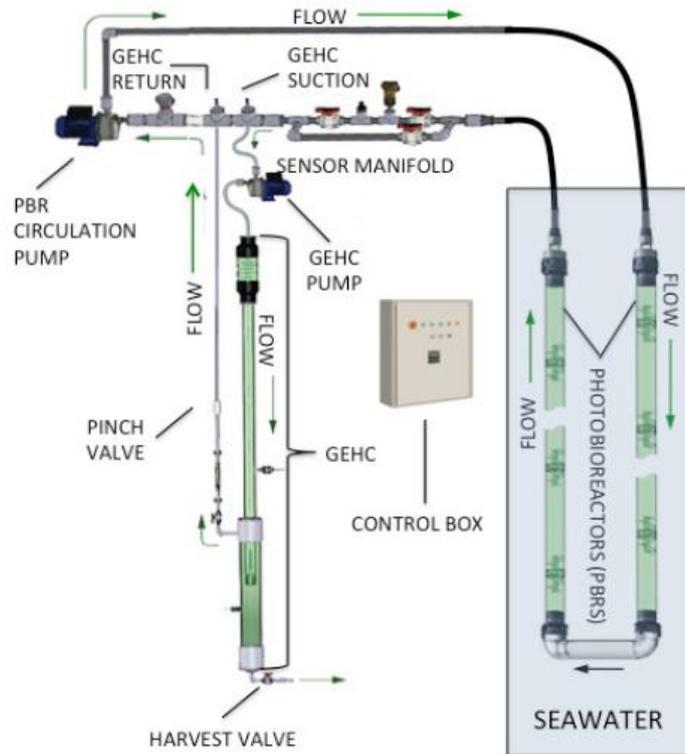
sedangkan panjang asam lemak yang ideal untuk pembuatan biodiesel adalah 12 hingga 14 karbon (Ramazanov dan Ramazanov, 2006), sedangkan untuk pembuatan bensin maupun bahan bakar jet dibutuhkan rantai karbon yang lebih pendek lagi dari 5 hingga 12 karbon. *Thioesterase* adalah enzim yang bertanggung jawab dalam penentuan panjang rantai karbon dari lipid. Setiap spesies memiliki jenis *thioesterase* yang spesifik untuk panjang rantai karbon tertentu. *Over*-ekspresi *thioesterase* tertentu dapat mempermudah proses pengolahan asam lemak menjadi *biofuel* dengan memotong jalur *cracking* asam lemak rantai panjang. Meskipun demikian, asam lemak rantai pendek yang dihasilkan masih harus tetap di olah melalui proses berikutnya, seperti transesterifikasi pada produksi biodiesel (Radakovits dkk., 2010).

Modifikasi mikroalga selanjutnya yang mungkin dilakukan dengan rekayasa genetik adalah meningkatkan kemampuan mikroalga agar dapat langsung menghasilkan *biofuel*. Produksi *biofuel* secara *in vivo* telah berhasil dilakukan pada *Escherichia coli*. *Pyruvate decarboxylase* untuk produksi etanol dari *Zymomonas mobilis* dan *wax ester synthase/ acyl-CoA-diacylglycerol acyltrans ferase* (WS/DGAT) dari *Acinetobacter baylyi* di-*over*-ekspresikan pada *E. coli* dan dapat menghasilkan *fatty acid etyl ester* (Kalscheuer dkk., 2006). Metode yang sama juga diharapkan dapat diterapkan pada mikroalga sehingga dapat mengurangi biaya produksi.

Selanjutnya, proses pemanenan biomassa mikroalga merupakan salah satu tantangan dalam pengembangan teknologi *biofuel* dari mikroalga. Selain proses pembentukan konsentrat biomassa dengan cara disaring ataupun dengan sentrifugasi, proses ekstraksi lipid yang terkandung didalam sel mikroalga merupakan hambatan utama. Pemecahan sel mikroalga untuk mengambil lipid yang terkandung didalamnya sangat tidak efisien dari segi biaya produksi, terutama untuk beberapa mikroalga yang memiliki dinding sel menyerupai dinding sel tumbuhan. Oleh karena itu, diperlukan rekayasa genetik pada mikroalga agar lipid yang dihasilkan dapat disekresikan keluar sel. *ATP-binding cassette* atau ABC *transporter* merupakan kandidat protein pengangkut yang mungkin di-*over*-ekspresikan pada mikroalga (Pighin dkk., 2004). Hingga saat ini, belum ada penelitian lebih lanjut mengenai sekresi lipid pada mikroalga.

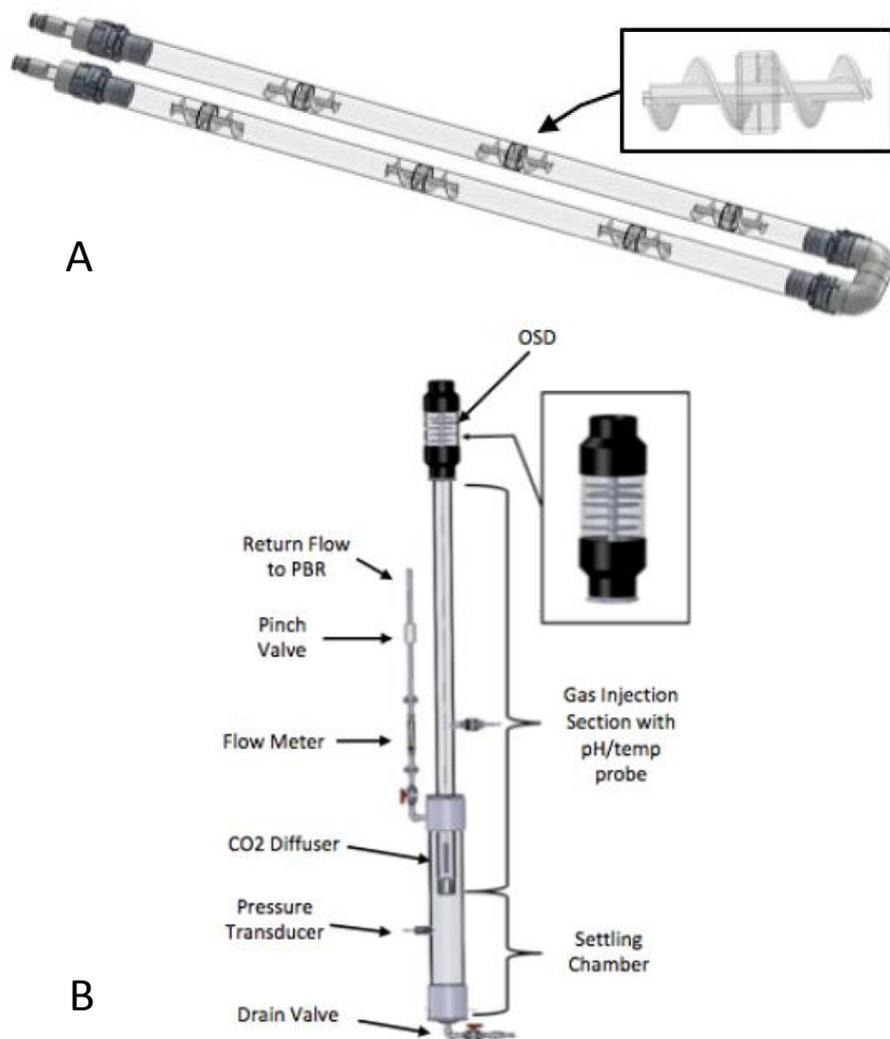
Kondisi lingkungan, seperti pH, salinitas, suhu, dan intensitas cahaya, merupakan faktor pembatas pertumbuhan mikroalga. Ketidaksesuaian faktor pembatas yang ada di alam dengan kebutuhan mikroalga untuk tumbuh akan menghambat dan menurunkan efisiensi dari produksi *biofuel*. Walaupun produksi *biofuel* dari mikroalga dilakukan pada sistem tertutup dengan menggunakan *photobioreactor*, tidak semua faktor pembatas dapat disesuaikan dengan kebutuhan mikroalga. Selain itu, regulasi faktor pembatas secara kontinu juga tidak efisien dalam jangka waktu panjang. Faktor pembatas seperti pH, salinitas dan suhu dapat diatur dan biaya yang dikeluarkan untuk itu masih masuk akal. Namun, berbeda halnya dengan intensitas cahaya yang akan sangat bergantung pada cahaya matahari. Penggunaan pencahayaan buatan yang dapat diatur intensitasnya akan membengkakkan biaya yang dikeluarkan dan akan melebihi keuntungan yang didapat. Oleh karena itu, perlu dikembangkan mikroalga dengan kemampuan fotosintesis yang optimum pada rentang cahaya tertentu. Pada dasarnya, fotosintesis hanya menggunakan cahaya merah dan biru serta memiliki kejenuhan terhadap intensitas cahaya. Peningkatan jangkauan cahaya yang digunakan untuk fotosintesis dapat dilakukan dengan *over*-ekspresi enzim yang bertanggung jawab dalam biosintesis pigmen. Selain itu, peningkatan titik jenuh terhadap cahaya dapat dilakukan dengan *over*-ekspresi fotosistem maupun delesi *terminal oxidase* (Bradley dkk., 2013).

3.3 Rancangan *Photobioreactor* Lepas Pantai

Photobioreactor (PBRs) lepas pantai dirancang untuk dapat mengambang dekat dengan permukaan laut. PBRs terdiri atas tiga bagian utama yaitu, sistem PBRs, *Gas Exchange and Harvesting Column* (GEHC), dan *Instrumentation and Control* (I&C). Bagian pendukung lainnya juga dipasang, seperti kabel yang menghubungkan sistem I&C dengan perangkat listrik lainnya, pH meter dan termometer yang dipasang pada PBR dan GEHC, serta *buoyant* untuk membantu *photobioreactor* tetap mengambang dekat dengan permukaan laut (Trent dkk. 2012). Berikut disajikan gambar *photobioreactor* lepas pantai.

Gambar 4. Rancangan *Photobioreactor* Lepas Pantai
[Sumber: Trent dkk., 2012]

Sistem PBRs dikonstruksi dari bahan *linear low-density polyethylene* (LLDPE) transparan yang berbentuk tabung dengan ukuran diameter dalam 11,4 cm dan panjang 3 m. Pada bagian dalam PBRs, terdapat baling-baling spiral yang berfungsi untuk mengaduk kultur mikroalga yang ada didalamnya. Antar baling-baling dipisahkan sejauh 0,9 m, sehingga ada tiga baling-baling dalam setiap tabung. Kemudian, setiap tabungnya akan disambung dengan *polyvynil chloride* (PVC) berbentuk U. Ujung hilir dan hulu dari sistem PBRs akan disambungkan ke GEHC. Ujung hilir sistem PBRs akan menerima karbon dioksida, nutrisi, dan kultur mikroalga yang tersisa dari GEHC, sedangkan ujung hulu sistem PBRs akan mentransfer kultur mikroalga ke GEHC untuk di panen dan mengatur kadar *dissolved oxygen* (DO) dari kultur mikroalga (Trent dkk., 2012).

Gas exchange and harvesting column memiliki tiga fungsi esensial, yaitu mengatur kadar oksigen terlarut/*dissolved oxygen* (DO); menyuplai karbon dioksida untuk kultur mikroalga dan mengatur tingkat keasamaan media; serta mengumpulkan kultur mikroalga untuk dipanen. Pada bagian hilir GEHC, *oxygen*

stripping device (OSD) dipasang untuk mengeluarkan oksigen yang marupakan hasil sampingan dari fotosintesis. Kemudian, GEHC disambungkan dengan pipa injeksi yang menyuplai karbon dioksida dan juga nutrisi ke kultur. Adapula pengukur tingkat keasaman, yang dipasang untuk menyesuaikan kadar karbon dioksida yang harus diinjeksikan. Pada bagian hulu, dipasang tabung untuk memanen biomassa mikroalga. Sebagian dari mikroalga akan disaring dari kultur untuk dipanen biomassanya, sedangkan sebagian lainnya akan dikembalikan ke PBRs. Debit kultur yang melalui GEHC tiap satuan waktunya diatur berdasarkan laju pertumbuhan mikroalga dan kadar (Trent dkk., 2012).

Gambar 5. A. Desain Tabung *Photobioreactor*;
B. Desain *Gas Exchange and Harvesting Column*
[Sumber: Trent dkk. 2012]

Sistem *instrumentation and control* (I&C) digunakan untuk menjalankan *photobioreactor* secara otomatis dan mengumpulkan data yang terkomputasi. Perangkat-perangkat yang terhubung dengan sistem I&C antara lain pH meter, termometer, DO meter, sensor *photsynthetically active radiation* (PAR), *flow meter*, *GEHC pressure transducer*, dan *fast repetition rate fluorometer* (FRRF). Perangkat tersebut akan memasukkan *input* data yang kemudian akan diolah oleh *programmable logic controller* dan ditransfer ke *human-machine interface* (HMI). Data yang diperoleh dapat digunakan secara manual oleh operator untuk mengatur kondisi PBRs atau secara otomatis PLC akan mengatur kondisi PBRs (Trent dkk. 2012).

Selain letaknya yang di lepas pantai, konstruksi PBRs juga harus memerhatikan beberapa hal untuk dapat meningkatkan efisiensi, terutama efisiensi pembiayaan. PBRs sebaiknya dibangun dekat dengan industri yang menghasilkan banyak karbon dioksida. Hal ini berguna untuk mengurangi pembiayaan suplai karbon dioksida. Selain itu, pembangunan PBRs juga sebaiknya dilakukan dekat dengan sumber air limbah. Hal ini dapat mengurangi pembiayaan suplai nutrisi. Meskipun demikian, perlu adanya kajian mengenai kandungan air limbah yang akan dipakai karena dapat saja kandungan air limbah yang ada akan menghambat, bukan malah mempercepat pertumbuhan alga. Selain itu, jika senyawa nutrisi dan racun tercampur di air limbah, perlu adanya pertimbangan ulang mengenai biaya untuk memisahkan nutrisi dari air limbah dibandingkan dengan suplai nutrisi non-limbah.

3.4 Analisis Ekonomi dalam Pengembangan *Biofuel* Berbasis Mikroalga di Indonesia

Berdasarkan analisis ekonomi yang dilakukan oleh Trent dkk. (2012), biaya produksi *biofuel* yang diperlukan untuk sistem *photobioreactor* lepas pantai adalah Rp86.710,00 per liter dengan asumsi produktivitas alga 25g/m^2/hari, densitas sel 0,3 kg/m^3, dan konten lipid 25% per total berat kering sel. Harga tersebut masih dapat diturunkan dengan mengintegrasikan sistem *photobioreactor* lepas pantai ini dengan tujuan lainnya seperti fasilitas pengolahan limbah, fasilitas pembangkit listrik lepas pantai, dan akuakultur. Integrasi sistem *photobioreactor*

lepas pantai dengan fasilitas pengolahan limbah menurunkan biaya produksi sebesar 13% biaya produksi; fasilitas pembangkit listrik lepas pantai sebesar 24%; dan akuakultur sebesar 41%. Total penurunan biaya produksi adalah 78% atau menurunkan biaya produksi menjadi Rp19.076,00 per liter. Biaya produksi masih dapat diturunkan dengan mengoptimalkan hasil produksi. Peningkatan produktivitas alga hingga 3 kg/m^3/hari, densitas sel 4 kg/m^3, dan konten lipid 60% per total berat kering sel akan menurunkan biaya produksi menjadi Rp22.737,00 per liter (NREL, 2009). Kombinasi antara sistem *photobioreactor* terintegrasi dengan peningkatan produksi akan menurunkan biaya produksi lebih jauh lagi menjadi Rp5.003,00 per liter, dengan asumsi, persentase penurunan adalah tetap (Trent dkk., 2012).

A

	Skenario produksi dasar	**Skenario produksi tinggi**
Produktivitas alga	25 g/m^2/hari	3 kg/m^3/hari
Densitas sel	0,3 kg/m^3	4 kg/m^3
Konten lipid	25%	60%
Biaya produksi keseluruhan	Rp. 86.710/liter	Rp. 22.737/liter

B

	% penurunan biaya produksi
Fasilitas pengolahan limbah	13%
Fasilitas pembangkit listrik lepas pantai	24%
Akuakultur	41%
Total penurunan seluruh sistem	78%

C

Estimasi biaya produksi terendah = biaya skenario produksi tinggi * (100% - % total penurunan seluruh sistem)

Estimasi biaya produksi terendah = Rp. 22.737/liter * (100% - 78%) = Rp. 5.003/liter

Gambar 6. A. Estimasi Biaya Produksi Berdasarkan Produktivitas;
B. Persentase Penurunan Biaya Produksi dengan Sistem *Photobioreactor* Terintegrasi;
C. Penghitungan Estimasi Biaya Produksi Terendah
[Sumber: Sintesis oleh Penulis dari Trent dkk., 2012]

Meskipun demikian, hasil penghitungan diatas belum memasukkan upah pekerja dan distribusi sehingga nominal yang didapat bukan merupakan harga jual *biofuel* yang dihasilkan. Selanjutnya, modal yang perlu dikeluarkan pertama kali akan lebih besar karena adanya proses rekayasa genetik mikroalga. Hal tersebut merupakan *trade-off* dari pengurangan biaya operasional jangka panjang. Penambahan modal awal yang dikeluarkan untuk rekayasa genetik mikroalga adalah Rp100 – 250 juta. Perlu diingat bahwa penambahan biaya untuk rekayasa

genetik ini hanya terjadi diawal dan tidak akan ada lagi penambahan biaya karena tidak adanya depresiasi nilai untuk rekayasa genetik yang sama. Mikroalga hasil rekayasa genetik akan terus membelah dan memperbarui dirinya sehingga tidak terjadi penurunan kualitas dari mikroalga hasil rekayasa genetik. Hal ini berbeda dengan investasi untuk pembuatan *photobioreactor* lepas pantai yang mengalami depresiasi sebesar 70,33% dalam jangka waktu 20 tahun.

Selain biaya produksi, harga *biofuel* juga dipengaruhi oleh biaya distribusi dan jumlah substituennya. Biaya distribusi bergantung pada rantai suplai barang dari produsen hingga ke tangan konsumen. Mengingat Indonesia memiliki garis pantai yang sangat panjang, diharapkan *photobioreactor* lepas pantai dapat dibangun di berbagai daerah di Indonesia sehingga dapat mempermudah distribusi dan menekan biaya distribusinya. Dalam hal harga *biofuel* berkaitan dengan substituennya, *biofuel* berbasis alga masih kalah bersaing dengan bahan bakar fosil maupun bahan bakar nabati lainnya. Meskipun demikian, pada masa mendatang keberadaan bahan bakar fosil perlahan-lahan akan ditinggalkan karena keberadaannya yang langka dan, sebaliknya, *biofuel* berbasis alga akan semakin diminati, sehingga harganya dapat bersaing di pasar.

BAB 4
SIMPULAN DAN REKOMENDASI

4.1 Simpulan

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan oleh penulis, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

(1) Optimasi produksi *biofuel* berbasis mikroalga dilakukan dengan pemilihan spesies atau galur mikroalga yang paling potensial, rekayasa genetik mikroalga yang dipilih, dan pembangunan *photobioreactor* lepas pantai.

(2) Rekayasa genetik mikroalga untuk meningkatkan produksi *biofuel* dilakukan dengan insersi ataupun delesi sekuens DNA yang terkait dengan peningkatan kandungan lipid per berat total biomassa, modifikasi prekursor *biofuel*, pembentukan *biofuel* langsung pada sel mikroalga, sekresi produk lipid oleh sel dan peningkatan efisiensi fotosintesis.

(3) *Photobioreactor* lepas pantai terdiri atas tiga bagian utama yaitu sistem *photobioreactor* (PBRs), *gas exchange and harvesting column*, dan sistem *instrumentation & control* (I&C) serta sebaiknya dibangun berdekatan dengan industri yang menghasilkan air limbah dan limbah karbon dioksida.

(4) Harga *biofuel* berbasis mikroalga hasil produksi *photobioreactor* dalam skenario dasar masih sangat mahal, yaitu sebesar Rp86.710,00 per liter. Namun, dengan peningkatan produktivitas dan membuat *photobioreactor* lepas pantai yang terintegrasi, harga dapat ditekan menjadi Rp5.003,00 per liter.

4.2 Rekomendasi

Implementasi dari *biofuel* berbasis mikroalga di Indonesia masih sangat jauh hingga dapat menjadi pengganti bahan bakar fosil. Meskipun demikian, pengembangan teknologi yang terkait dengan produksi *biofuel* berbasis mikroalga harus sudah mulai dikembangkan dari sekarang. Agar rencana ini dapat dimulai, perlu adanya perluasan dan percepatan investasi. Hal ini dapat diwujudkan dengan peran aktif dari Pusat Investasi Pemerintah (PIP) dan telah diatur didalam PMK nomor 177/KMK.01/2010 yang telah menetapkan PIP untuk melaksanakan investasi langsung pada bidang ramah lingkungan, yang salah satunya energi ramah lingkungan. Selain itu, untuk mempercepat pengembangan biofuel mikroalga, penelitian dapat dilakukan dengan cara menyebarkan bagian penelitian dan pengembangan dari industri biofuel mikroalga ini ke beberapa universitas di Indonesia yang memiliki laboratorium yang menunjang.

Meskipun demikian, kajian untuk faktor lainnya selain hal teknis, seperti analisis dampak lingkungan dari pembuatan *photobioreactor* lepas pantai juga perlu dilakukan. Demikian pula dengan analisis risiko dan mitigasi dari penggunaan mikroalga hasil rekayasa genetik. Selain itu, Indonesia sangat kaya dengan biodiversitasnya sehingga diperlukan penggalian potensi-potensi dari mikroalga endemik yang ada di Indonesia, terutama prospek potensinya sebagai bahan baku *biofuel*.

DAFTAR PUSTAKA

Borowitzka, M.A dan L. J. Borowitzka. 1988. *Micro-algal Biotechnology* Cambridge University Press.

Bradley, R. W., P. Bombelli, D. J. Lea-Smith dan C. J. Howe. 2013. Terminal oxidase mutants of the cyanobacterium Synechocystis sp. PCC 6803 show increased electrogenic activity in biological photo-voltaic systems. *Physical Chemistry & Chemical Physic* 15: 13611–13618.

Chisti, Y. 2007. Biodiesel from Microalgae. *Biotechnology Advances* 25: 294–306.

Hannon, M., J. Gimpel, M. Tran, B. Rasala, dan S. Mayfield. 2010. Biofuels From Algae: Challenges and Potential. *Biofuels* 1 (5): 763–784.

Kalscheuer, R., T. Stolting, dan A. Steinbuchel. 2006. Microdiesel: *Escherichia coli* Engineered for Fuel Production. *Microbiology* 152: 2529–2536.

Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. 2015. *Peratiran Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor:12 Tahun 2015*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

National Renewable Energy Laboratory. 2009. *Techno-Economic Analysis of Microalgae-Derived Biofuel Production*. NREL Technical Memorandum.

Nazari, F. dan J. Raheb. 2015. Genetic Engineering of Microalgae for Enhanced Biodiesel Production Suitable Fuel Replacement of Fossil Fuel as a Novel Energy Resource. *American Journal of Life Sciences* 3 (1): 32–41.

Pighin, J. A., H. Zheng, L. J. Balakshin, I. P. Goodman, T. L. Western, R. Jetter, L. Kunst, dan A. L. Samuels. 2004. Plant Cuticular Lipid Export Requires an ABC Transporter. *Science* 306: 702–704.

Pusat Teknologi Sumber Daya Energi dan Industri Kimia (PTSEIK)-Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). 2016. *Outlook Energi Indonesia 2016: Pengembangan Energi Untuk Mendukung Industri Hijau*. Pusat Teknologi Sumber Daya Energi dan Industri Kimia (PTSEIK)-Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).

Radakovits, R., R. E. Jinkerson, A. Darzins, dan M. C. Posewitz. 2010. Genetic Engineering of Algae for Enhanced Biofuel Production. *Eukaryotic Cell* 4 (9): 486–501.

Ramazanov, A., dan Z. Ramazanov. 2006. Isolation and Characterization of a Starchless Mutant of *Chlorella pyrenoidosa* STL-PI With a High Growth Rate, and High Protein and Polyunsaturated Fatty Acid Content. *Phycological Research* 54: 255–259.

Sekretariat Dewan Energi Nasional. 2015. *Ketahanan Energi Indonesia 2015.* Sekretariat Dewan Energi Nasional.

Szaub, J. B. 2012. *Genetic Engineering of Green Microalgae for the Production of Biofuel and High Value Products*. Department of Structural and Molecular Biology, University College London.

Trent, J. 2012. *Offshore Membrane Enclosure for Growing Algae (OMEGA): A Feasibility Study for Wastewater to Biofuels.* NASA Ames Research Center.

Varman, A. 2010. *An Improved Plasmid Vector System for Genetic Engineering of Synechocystis sp PCC 6803.* Washington University Open Scholarship.

Zabawinski, C. N., V. D. Koornhuyse, C. D'Hulst, R. Schlichting, C. Giersch, B. Delrue, J. M. Lacroix, J. Preiss, dan S. Ball. 2001. Starchless Mutants of *Chlamydomonas reinhardtii* lack the small subunit of a heterotetrameric ADP-Glucose Pyrophosphorylase. *Journal of Bacteriology* 183: 1069–1077.